

吾拉尔·哈那哈提等 乌鲁木齐市大气可吸入颗粒物中多环芳烃的污染特征及来源解析

乌鲁木齐市大气可吸入颗粒物中多环芳烃的污染特征及来源解析^{*}

吾拉尔·哈那哈提¹ 迪丽努尔·塔力甫¹ 买里克扎提·买合木提¹ 王新明² 丁翔²
(1.新疆大学化学化工学院,新疆 乌鲁木齐 830046;2.中国科学院广州地球化学研究所,广东 广州 510640)

摘要 在乌鲁木齐市南、北设置2个采样点,从2011年3—12月采集可吸入颗粒物(PM_{2.5}、PM_{2.5-10})样品,分析了美国环境保护署优控的13种多环芳烃(PAHs)的浓度,采用比值法、主成分分析法和多元线性回归法对乌鲁木齐市大气PM_{2.5}、PM_{2.5-10}中PAHs的来源进行了分析。结果表明,科学院站PM_{2.5}中13种PAHs的总质量浓度平均值为247.2 ng/m³,变动范围为1.14~2 113.33 ng/m³;新大站PAHs的总质量浓度平均值为240.84 ng/m³,变动范围为4.96~1 359.41 ng/m³。而科学院站PM_{2.5-10}中13种PAHs的总质量浓度平均值为57.78 ng/m³,变动范围为1.18~519.87 ng/m³;新大站的总质量浓度平均值为49.18 ng/m³,变动范围为1.38~412.52 ng/m³。比值法分析结果表明,所采集样品的2/3来自煤和生物质的燃烧排放;主成分分析法和多元线性回归分析法结果表明,采暖期汽油和煤源对PM_{2.5}中总PAHs的贡献率为46%,而非采暖期混合源的贡献率高达85%。采暖期汽油和柴油源对PM_{2.5-10}中总PAHs的贡献率为66%,而非采暖期混合源的贡献率为78%。

关键词 多环芳烃 乌鲁木齐 源解析 主成分分析法

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2015.01.007

Source apportionment of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in inhalable particulate matter at heating and non-heating periods in Urumqi, China WULAER · Hanahati¹, DILINUER · Talifu¹, MAILIKEZATI · Maihenmuti¹, WANG Xinming², DING Xiang². (1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830046; 2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou Guangdong 510640)

Abstract: Concentration of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in inhalable particulate matter (PM_{2.5}, PM_{2.5-10}) samples collected from March 2011 to December 2011 were analyzed at two sampling point of south and north sites of Urumqi. All samples divided into two categories depending on heating and non-heating period and ratio method, factor analysis method and multiple regression model were applied to source apportionment experiment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in PM_{2.5}, PM_{2.5-10}. The results of ratio method indicated that coal and biomass burning was the main source (about two-thirds) of the samples. Factor analysis method and multiple regression model were showed that in the heating period contribution of gasoline emission and coal combustion accounted for 46% of PM_{2.5} while mixed source up to 85% during the non-heating period. At the same time, contribution of gasoline and diesel emission accounted for 66% during the heating period while mixed source accounted for 78% in PM_{2.5-10} during the non-heating period.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons; Urumqi; source apportionment; principal component analysis

多环芳烃(简称PAHs)主要是由煤炭、石油、天然气等化石燃料及木材、有机高分子化合物、烟草等含碳氢化合物的物质经热解或不完全燃烧形成^[1]。PAHs化合物主要存在于大气细颗粒物中,而且数量大、种类繁多,大部分都具有致癌性、致畸性和致突变性。其中,苯并[a]芘是PAHs中一种致癌活性较强的代表性化合物^[2]。PAHs来源广泛,主要来自工业污染源(炼焦、炼钢、炼油)、交通污染源(汽油

车、柴油车的尾气排放)和生活污染源(烹调、燃煤、燃柴、吸烟、民用燃油)^[3-4],因此对PAHs的源解析研究不容忽视。常见的源解析方法有多元统计法^[5]、比值法以及CMB受体模型法^[6]等。其中多元统计法,当缺少特异性标志物时,确定因子所代表的源存在一定的主观性,而且得出的因子载荷和因子得分会出现负值,与实际情况不符^[7];比值法无法定量计算各污染源的贡献,因此无法单独使用;CMB

第一作者:吾拉尔·哈那哈提,男,1987年生,硕士研究生,研究方向为环境监测与评价。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(No.41165006);新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(No.2012211A019)。

受体模型法需要输入特定的源谱,某些源谱的相似性会导致共线性问题,以致源贡献出现负值。

目前我国对 $PM_{2.5}$ 中 PAHs 的研究主要集中在京津地区^[8-9]、广州地区^[10]、长江三角洲^[11]和珠江三角洲^[12]等较发达地区。新疆地区对 $PM_{2.5}$ 的研究还相对较少,仅在乌鲁木齐市内监测,具体的污染来源不清楚。亚力昆江·吐尔逊^[13]、伊丽米热·阿布达力木^[14]在新疆大学本部采样点,分别从 2008 年 9 月至 2010 年 2 月、2010 年 9 月至 2011 年 3 月采集大气 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{2.5-10}$,讨论了不同年份的冬、秋季 PAHs 的浓度变化,并运用比值法和主成分分析法对 PAHs 来源进行了解析。2 种方法结果均表明,冬季污染主要来源于燃煤排放,秋季主要来源于车辆排放和煤的燃烧。以上研究均基于冬、秋季节,对乌鲁木齐市大气可吸入颗粒物中 PAHs 的源解析局限于研究比值法和主成分分析法。为了全面分析乌鲁木齐市大气可吸入颗粒物中 PAHs 的来源,本研究同时采用比值法和主成分分析法结合多元线性回归(MLR)法进行源解析,计算出各源对 PAHs 的贡献率。

1 材料与方法

1.1 采样

根据乌鲁木齐市南高北低的特点选用 2 个采样点(见图 1),均设在城区。一个设在乌鲁木齐市新疆大学 5 号楼楼顶(新大站),大气入口与地面距离为 15 m,此采样点距乌鲁木齐主干道胜利路 200 m,距新疆大学锅炉房 500 m,后面是家属院,左右邻教

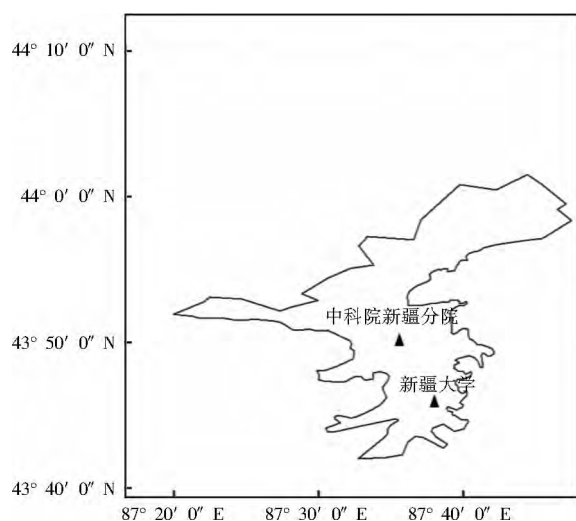


图 1 大气可吸入颗粒物采样点
Fig.1 Atmospheric particulate matter sampling sites

学楼,前 200 m 为绿化地带,该采样点可以代表乌鲁木齐市南部大气的基本特征。另一个设在乌鲁木齐市中科院新疆分院新疆天文站大楼 3 层楼侧(科学院站),距地面高度 9 m,此点距乌鲁木齐市主干道——北京路 500 m,距次车道 200 m,可以排除汽车尾气及道路尘的干扰。

采样时间为 2011 年 3—12 月,每个采样点每月连续不少于 5 次采样,每次连续采样 24 h,共采集 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{2.5-10}$ 环境样品 216 个。为了保证主成分分析法、MLR 法统计数据的量,提高计算结果的准确性,依据乌鲁木齐市供暖情况,将 3 月 1 日至 4 月 10 日及 10 月 15 日至 12 月 30 日的样品作为采暖期样品,其余则为非采暖期样品进行归纳。采样滤膜为石英滤膜。

1.2 样品处理及分析方法

1.2.1 膜的前处理及分析

膜的前处理及分析参照文献^[15]进行。

1.2.2 质量控制和质量保证

分析参考美国环境保护署 610 方法^[16],试剂空白、实验室空白和回收率实验结果均在可接受范围内,每种 PAHs 工作标准曲线线性良好,相关系数(R^2)在 0.996~1.000,仪器精度为 92%~99%($n=6$)。在确定最低检出限时,配制接近方法检测限浓度的标准品,连续进样 5 次进行重复性试验。本试验中氘代 PAHs 作为内标物。美国环境保护署 16 种优控 PAHs 中,本研究报道其中的 13 种,分别为菲(Phe,3 环)、蒽(Ant,3 环)、荧蒽(Flu,4 环)、芘(Pyr,4 环)、䓛(Chr,4 环)、苯并[a]蒽(BaA,4 环)、苯并[b]荧蒽(BbF,4 环)、苯并[b+k]荧蒽(BkF,5 环)、苯并[a]芘(BaP,5 环)、苯并[e]芘(BeP,5 环)、二苯并[ah]蒽(DahA,5 环)、茚并[1,2,3-cd]芘(IcdP,6 环)和苯并[ghi]芘(BghiP,6 环)。由于蔡、芘、芘烯 3 种低分子量化合物具有高挥发性的特点,回收率较低,故本研究没有讨论这 3 种化合物。

2 结果与讨论

2.1 PAHs 含量与粒径分布

由图 2 可知,科学院站 $PM_{2.5}$ 中 13 种 PAHs 的总质量浓度平均值为 247.2 ng/m^3 ,变动范围为 1.14~2 113.33 ng/m^3 ;新大站 $PM_{2.5}$ 中的 PAHs 总质量浓度平均值为 240.84 ng/m^3 ,变动范围为 4.96~1 359.41 ng/m^3 。而科学院站 $PM_{2.5-10}$ 中 13 种 PAHs 的总质

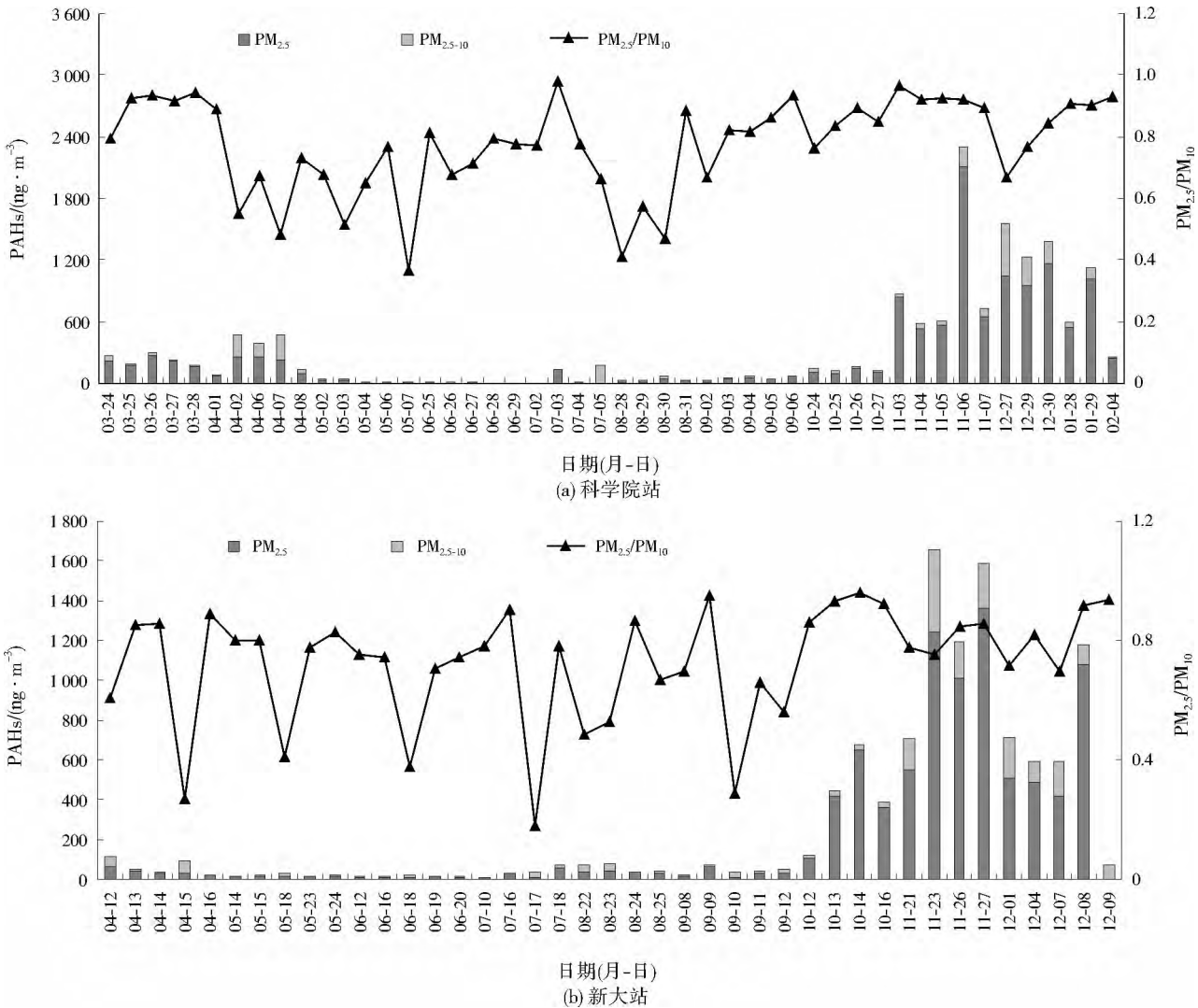


图2 PAHs总质量浓度日变化趋势
Fig.2 Diurnal variations of total PAHs concentrations

量浓度平均值为57.78 ng/m³,变动范围为1.18~519.87 ng/m³,新大站PM_{2.5-10}中PAHs的总质量浓度平均值为52.38 ng/m³,变动范围为1.38~412.52 ng/m³。科学院站PAHs的年均浓度均高于新大站,其原因可能是科学院站一方面更靠近北面的工业区^[17],另一方面科学院站附近车流密度和建筑密度均高于新大站。就粒径分布而言,PM_{2.5}与PM₁₀的比例,科学院站为0.37~0.98,平均值为0.78;新大站为0.18~0.96,平均值为0.73。这表明PAHs主要分布在细颗粒物中。

2.2 来源分析

采用比值法、主成分分析法结合多元线性回归法,对各种源的贡献进行了定量和半定量的分析。

2.2.1 比值法

利用母体PAHs异构体对的比值,区别环境中

PAHs不同的来源^[18]。Flu/(Flu+Pyr)、IcdP/(IcdP+BghiP)是常用的2种比值。由图3可看出,不论是采暖期还是非采暖期,所采集样品的2/3来

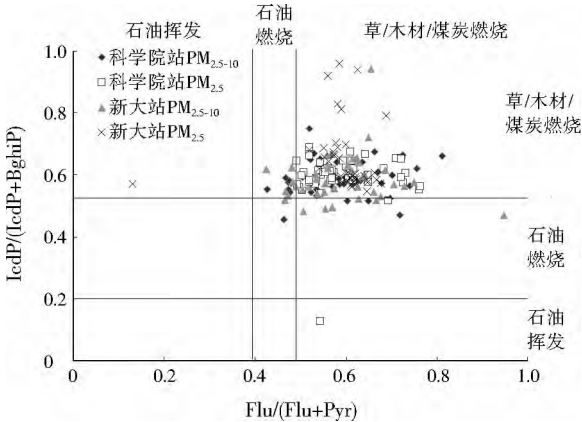


图3 PAHs稳定异构体对来源指示
Fig.3 Instructions of the PAHs stable isomers

表 1 采暖期方差极大正交旋转后的主成分特征根和方差贡献
Table 1 Rotated component eigenvalues and loadings of heating period

主成分	PM _{2.5}			主成分	PM _{2.5-10}		
	特征根	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%		特征根	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	5.474	39.1	39.1	1	6.922	49.4	49.4
2	3.721	26.6	65.7	2	4.370	31.2	80.7
3	2.050	14.6	80.3	3			
4	1.891	13.5	93.8	4			

表 2 非采暖期方差极大正交旋转后的主成分特征根和方差贡献
Table 2 Rotated component eigenvalues and loadings of non-heating period

主成分	PM _{2.5}			主成分	PM _{2.5-10}		
	特征根	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%		特征根	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	9.526	68.0	68.0	1	11.246	80.3	80.3
2	2.526	18.1	86.1	2	1.780	12.7	93.0

表 3 方差极大旋转后的主成分载荷(采暖期)
Table 3 Rotated component matrix (heating period)

特征来源	PM _{2.5}				PM _{2.5-10}	
	主成分 1 汽油+煤	主成分 2 煤+焦炉	主成分 3 煤	主成分 4 汽油	主成分 1 汽油+柴油	主成分 2 煤+焦炉
Phe	0.057	0.045	0.989	0.003	0.389	0.642
Ant	0.237	0.950	0.112	0.059	0.109	0.948
Flu	0.130	0.951	0.054	-0.020	0.033	0.850
Pyr	0.295	0.921	0.001	0.076	0.245	0.661
BaA	0.481	0.757	0.061	0.357	0.581	0.776
Chr	0.925	0.274	0.049	0.200	0.951	0.277
BbF	0.907	0.270	0.045	0.214	0.937	0.278
BkF	0.940	0.236	0.056	0.153	0.907	0.282
BeP	0.672	0.175	0.021	0.717	0.938	0.244
IcdP	0.732	0.064	-0.084	-0.039	0.539	0.017
BaP	0.210	0.054	-0.012	0.961	0.933	0.289
DahA	0.896	0.267	0.067	0.312	0.920	0.202
BghiP	0.826	0.393	0.234	0.329	0.884	0.464

自煤和生物质燃烧排放,而1/3则来自燃油。此结果主要与乌鲁木齐市的能源结构有关。采样期内乌鲁木齐市除冬季取暖以燃煤为主之外,周边的火电厂(如红雁池电厂)也是 PAHs 的重要来源。

2.2.2 主成分分析法

2 个站点数据按采暖期与非采暖期,利用主成分分析法对检测得到的 13 种 PAHs 进行分析。由表 1、表 2 可知,采暖期 PM_{2.5} 提取的前 4 个主成分因子累计方差贡献率达 93.8%,非采暖期间提取的 2 个主成分因子累计方差贡献率为 86.1%,PM_{2.5-10} 不论是采暖期还是非采暖期 2 个主成分因子的累计方差贡献率均大于 80%。表 3、表 4 列出了 13 种 PAHs 在采暖期及非采暖期的主成分载荷。

在采暖期,对于 PM_{2.5} 颗粒:Chr、BbF、BkF、DahA、BghiP 对主成分 1 的载荷都大于 0.8。因 BbF、

表 4 方差极大旋转后的主成分载荷(非采暖期)
Table 4 Rotated component matrix(non-heating period)

特征来源	PM _{2.5}		PM _{2.5-10}	
	主成分 1 混合	主成分 2 煤	主成分 1 混合	主成分 2 煤
Phe	-0.018	0.953	-0.027	0.921
Ant	0.277	0.759	0.954	0.172
Flu	0.810	0.282	0.981	0.070
Pyr	0.814	0.233	0.959	0.049
BaA	0.833	0.401	0.977	0.050
Chr	0.992	0.071	0.985	0.007
BbF	0.991	0.096	0.986	0.000
BkF	0.991	0.068	0.984	-0.007
BeP	0.830	-0.108	0.961	0.033
BaP	0.982	0.134	-0.986	0.027
IcdP	0.947	0.230	-0.881	0.065
DahA	0.988	0.100	0.989	0.011
Bghip	0.976	0.175	0.960	0.273

表 5 PAHs 总量与主成分得分变量多元线性回归结果(采暖期)¹⁾
Table 5 Multiple linear regression between total PAHs and principle components score (heating period)

项目	PM _{2.5}				PM _{2.5-10}	
标准化回归方程	$P \sum \text{PAHs} = 0.826f_1 + 0.393f_2 + 0.329f_3 + 0.234f_4$				$P \sum \text{PAHs} = 0.884f_1 + 0.464f_2$	
主成分	主成分 1 汽油+煤	主成分 2 煤+焦炉	主成分 3 煤	主成分 4 汽油	主成分 1 汽油+柴油	主成分 2 煤+焦炉
参数贡献率/%	46	22	18	14	66	34
参数检验相伴概率(P)	0	0	0	0	0	0
R ²	0.999				0.997	
方程检验相伴概率	0				0	

注:¹⁾ $P \sum \text{PAHs}$ 指 PAHs 总量; f_1, f_2, f_3, f_4 分别为主成分 1、主成分 2、主成分 3、主成分 4,表 6 同。

表 6 PAHs 总量与主成分得分变量多元线性回归结果(非采暖期)
Table 6 Multiple linear regression between total PAHs and principle components score(non-heating period)

项目	PM _{2.5}		PM _{2.5-10}	
标准化回归方程	$P \sum \text{PAHs} = 0.976f_1 + 0.175f_2$		$P \sum \text{PAHs} = 0.960f_1 + 0.273f_2$	
主成分	主成分 1 混合	主成分 2 煤	主成分 1 混合	主成分 2 煤
参数贡献率/%	85	15	78	22
参数检验相伴概率(P)	0	0	0	0
R ²	0.984		0.996	
方程检验相伴概率	0		0	

BkF、DahA、BgHi 为汽油排放标示物^[19-20],Chr 则为煤燃烧排放标示物,所以主成分 1 为汽油和煤;Ant、Flu、Pyr 对主成分 2 的载荷均超过 0.9,其中 Ant、Pyr 为煤燃烧排放,Flu 为焦炉排放标示物,所以主成分 2 为煤和焦炉;Phe 对主成分 3 的贡献率为 98.9%,而 Phe 为煤的标示物,即主成分 3 为煤;BaP 对主成分 4 的贡献率为 96.1%,而 BaP 为汽油的标示物,即主成分 4 为汽油。

对于 PM_{2.5-10} 颗粒:Chr、BbF、BkF、BeP、BaP、DahA、BgHiP 对主成分 1 的贡献率都大于 80%,经分析主成分 1 为汽油和柴油;而 Ant、Flu 对主成分 2 的贡献率分别为 94.8%和 85.0%,所以主成分 2 为煤和焦炉。总之,采暖期乌鲁木齐市可吸入颗粒物的来源主要为汽油、柴油、煤和焦炉排放。此结果与文献[21]冬季源解析结果相似。由表 4 可见,非采暖期 PAHs 主要来源为混合源和煤源。

2.3 多元线性回归法

以标准化主成分得分变量为解释变量,标准化的 13 种 PAHs 总量为被解释变量,进行多元线性回归。采用逐步回归的方法,设定进入方程的变量的显著水平为 0.05,从方程中剔除变量的显著水平为 0.10,由此获得方程的标准化回归系数可以反映各主成分因子,即各主要源的相对贡献率(见表 5、表 6),R²的最低值为 0.984。由表 5、表 6 进一步可以看出,采暖期汽油和煤源对 PM_{2.5} 中总 PAHs 的贡献率为 46%,而非采暖期混合源对 PM_{2.5} 的贡献

率高达 85%;采暖期汽油和柴油源对 PM_{2.5-10} 中总 PAHs 的贡献率为 66%,而非采暖期混合源对 PM_{2.5-10} 的贡献率为 78%。由此说明乌鲁木齐市可吸入颗粒物中 PAHs 污染在采暖期可通过减少某一特定源如燃煤、汽车尾气来降低,但是在非采暖期就要通过综合治理减少 PAHs 的排放。

3 结 论

- (1) 乌鲁木齐市大气采暖、非采暖期 PM_{2.5}、PM_{2.5-10} 中检测出 PAHs 主要存在于细颗粒物中。
- (2) 根据主成分分析法得出采暖期 PAHs 主要来源为汽油、柴油、煤和焦炉排放。
- (3) 运用多元线性回归法半定量确定各种源对 PAHs 的贡献率,采暖期与非采暖期间贡献率分别为:在采暖期,PM_{2.5} 中汽油和煤源贡献率为 46%,煤和焦炉源贡献率为 22%,煤源贡献率为 18%,汽油源贡献率为 14%,PM_{2.5-10} 中汽油和柴油源贡献率为 66%,煤和焦炉源贡献率为 34%;非采暖期间,PM_{2.5} 中混合源贡献率为 85%,煤源贡献率为 15%。PM_{2.5-10} 中混合源贡献率为 78%,煤源贡献率为 22%。

参考文献:

[1] 魏复盛,CHAPMAN R S.空气污染对呼吸健康影响研究[M].北京:中国环境科学出版社,2001:26-50.
[2] 朱坦,孙韧,张林,等.大港地区大气颗粒物中多环芳烃分布及污染源识别的研究[J].中国环境科学,1998,18(4):289-292.
[3] 张树才,张巍,王开颜,等.北京东南郊大气 TSP 中多环芳烃浓

- 度特征与影响因素[J].环境科学,2007,28(3):40-46.
- [4] 朱利中,王静,杜焯,等.汽车尾气中多环芳烃(PAHs)成分谱图研究[J].环境科学,2003,24(3):26-29.
- [5] LIM M C H, AYOKO G A, MORAWSKA L. Characterization of elemental and polycyclic aromatic hydrocarbon compositions of urban air in Brisbane[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(3):463-476.
- [6] PARK S S, KIM Y J. Source contributions to fine particulate matter in an urban atmosphere[J]. Chemosphere, 2005, 59(2):217-226.
- [7] 郭伟峰,戴树桂.水环境多环芳烃源解析研究进展[J].环境污染治理技术与设备,2005,6(10):8-12.
- [8] 张迪瀚,马永亮,贺克斌,等.北京市大气颗粒物中多环芳烃(PAHs)污染特征[J].环境科学,2006,27(7):1269-1272.
- [9] 李伟芳,白志鹏,魏静东,等.天津冬季大气中PM_{2.5}及其主要组分的污染特征[J].中国环境科学,2008,28(6):481-486.
- [10] 李军,张干,祁士华.广州市大气中多环芳烃分布特征、季节变化及其影响因素[J].环境科学,2004,25(3):7-12.
- [11] 孟昭阳,贾小芳,张仁健,等.2010年长江三角洲临安本底站PM_{2.5}理化特征[J].应用气象学报,2012,23(4):424-432.
- [12] 胡珊,张远航,魏永杰.珠江三角洲大气细颗粒物的致癌风险及源解析[J].中国环境科学,2009,29(11):1202-1208.
- [13] 亚力昆江·吐尔逊.乌鲁木齐市大气颗粒物化学特征的初探[D].乌鲁木齐:新疆大学,2010:51-52.
- [14] 伊丽米热·阿布达力木.大气可吸入颗粒物中重金属、多环芳烃粒径分布及DNA损伤方法研究——新疆大学为例[D].乌鲁木齐:新疆大学,2012:31-39.
- [15] MURAKAMI M, NAKAJIMA F, FURUMAI H. Modelling of runoff behaviour of particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from roads and roofs[J]. Water Research, 2004, 38(20):4475-4483.
- [16] GAO Bo, GUO Hai, LING Zhenhao, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} in Guangzhou, southern China: spatio-temporal patterns and emission sources[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 239/240:78-87.
- [17] DONG Zhiwen, LI Zhongqin, EDWARDS R, et al. Temporal characteristics of mineral dust particles in precipitation of Urumqi River Valley in Tian Shan, China: a comparison of alpine site and rural site[J]. Atmospheric Research, 2011, 101:294-305.
- [18] SUN Yele, ZHUANG Guoshun, WANG Ying, et al. Chemical composition of dust storms in Beijing and implications for the mixing of mineral aerosol with pollution aerosol on the pathway[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(D24):24-27.
- [19] SIMCIK M F, EISENREICH S J, LLOYD P J. Source apportionment and source/sink relationships of PAHs in the coastal atmosphere of Chicago and Lake Michigan[J]. Atmospheric Environment, 1999, 33:5071-5079.
- [20] HARRISON R M, SMITH D J T, LUHANA L. Source apportionment of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons collected from an urban location in Birmingham, U.K.[J]. Environmental Science and Technology, 1996, 30:825-832.
- [21] ABUDALIMU Y, TALIFU D, YIMITI A, et al. Autumn and wintertime polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} and PM_{2.5-10} from Urumqi China[J]. Aerosol and Air Quality Re-

search, 2013, 13(1):407-414.

编辑:贺锋萍 (修改稿收到日期:2014-06-17)

(上接第34页)

时,沉淀物稳定性随着温度的升高而降低。这表明适当提高温度有利于重金属离子的去除及其铁氧体的生成,但是过高的温度反而起到反作用。从经济角度考虑,将温度控制在70℃,即可达到去除与回收重金属的目的。

3 结论与结语

(1) 利用中和共沉淀—铁氧体法处理含镍、铬废水,镍、铬去除率高,可达98%以上,能达到GB 8978—1996的要求。

(2) 利用中和共沉淀—铁氧体法处理混合重金属废水,对于等物质的量的Ni²⁺和Cr₂O₇²⁻混合废水,处理工艺的最佳条件为:Fe²⁺/(Ni²⁺+Cr₂O₇²⁻)=9, pH=9,温度70℃。

(3) 中和共沉淀—铁氧体法处理工艺简单,条件温和易控制,操作方便,且产生的铁氧体沉渣化学性质稳定,不存在二次污染,可以回收利用,是一种有应用价值的重金属废水处理技术。

参考文献:

- [1] 彭人勇,姚建霞.铁氧体法处理高浓度化学镀镍废水的研究[J].工业水处理,2011,31(7):67-70.
- [2] 杨群,宁平,陈芳媛,等.铁氧体法处理沉镍残液研究[J].武汉理工大学学报,2010,32(8):93-96.
- [3] PEPE H S, UCHIYAMA H, IGARASHI T, et al. Acid mine drainage treatment through a two-step neutralization ferrite-formation process in northern Japan: physical and chemical characterization of the sludge[J]. Minerals Engineering, 2007, 20(14):1309-1314.
- [4] LOU J C, CHANG C K. Completely treating heavy metal laboratory waste liquid by an improved ferrite process[J]. Separation and Purification Technology, 2007, 57(3):513-518.
- [5] 陈明,徐妍.铁氧体的研究进展[J].化学工程师,2014(1):37-41.
- [6] 刘俊,王三反,陈霞,等.铁氧体强化低温低浊水的处理效果[J].环境工程学报,2012(6):1971-1974.
- [7] 李国福,代建清,夏井兵,等.化学共沉淀法制备NiCuZn铁氧体及其性能研究[J].稀有金属材料与工程,2013(12):2625-2628.
- [8] 夏井兵,代建清,李国福,等.化学共沉淀法制备MnZn铁氧体前驱物微粉及其性能[J].功能材料,2012(5):626-629.
- [9] 常军霞,王三反,陈霞.铁氧体共沉淀法处理含Ni²⁺废水的研究[J].工业水处理,2011,31(3):46-48.
- [10] 常君霞,王三反,王挺,等.化学共沉淀—铁氧体法对含铬废水的处理工艺[J].净水技术,2010,29(6):36-39.

编辑:陈泽军 (修改稿收到日期:2014-10-16)